

缓释氮肥减施对夏玉米产量与氮肥利用效率的影响

李援农 张 利 谷晓博 周佳明 赵 晓

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对陕西关中地区夏玉米农田存在施氮量过多、氮肥利用效率过低的问题,设置常规施氮 N1 (300 kg/hm²)、100% 缓释氮肥 N2 (300 kg/hm²)、65% 缓释氮肥 N3 (195 kg/hm²)、30% 缓释氮肥 N4 (90 kg/hm²)、不施氮 N0 共 5 个施氮水平,磷肥和钾肥均按统一标准施用,以不施肥 CK 为对照,于 2018 年和 2019 年在陕西杨凌地区进行了田间试验,研究不同缓释氮肥减施量对夏玉米地上部干物质累积、氮素累积吸收量、土壤硝态氮分布及累积、产量和氮肥利用效率等指标的影响。结果表明:施加氮肥可以显著提高夏玉米地上部干物质累积量、氮素吸收量和产量,与当地常规施氮 N1 处理相比,N2 处理和 N3 处理的地上部干物质累积量及氮素累积吸收量、氮素吸收效率、氮肥偏生产力、产量等指标均有显著增加;两年试验,N2 处理与 N3 处理的地上部干物质累积量、氮素累积吸收量、产量无显著差异,但 N3 处理的氮肥偏生产力较 N2 两年分别提高 54.61% 和 56.25%,氮肥农学利用率分别提高 35.24% 和 61.48%,营养器官氮素转运率分别提高 17.34% 和 18.10%;缓释氮肥减施可以显著降低 0~200 cm 土层的硝态氮残留量,并且可以提高 0~40 cm 土层硝态氮占比,0~40 cm 土层硝态氮占比最大的为 N3 处理,较其他施氮处理提高 6.82%~118.60%。在既能满足较高产量又能满足较高氮肥利用效率、较低氮素流失的情况下,缓释氮肥纯氮施用量 195 kg/hm² 是该地区较优的施肥方式。

关键词: 夏玉米; 缓释氮肥; 产量; 氮肥利用; 土壤硝态氮

中图分类号: S513; S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)06-0285-10

OSID:



Effect of Reduced Application of Slow Release Nitrogen Fertilizer on Yield and Nitrogen Utilization Efficiency of Summer Maize

LI Yuannong ZHANG Li GU Xiaobo ZHOU Jiaming ZHAO Xiao

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In response to the problem of excessive nitrogen application and low nitrogen use efficiency in summer maize farmland in Guanzhong, Shaanxi, a two-year field trial was set up in Yangling, Shaanxi in 2018 and 2019. Five levels of nitrogen application (conventional nitrogen application N1 (300 kg/hm²), 100% slow-release nitrogen fertilizer N2 (300 kg/hm²), 65% slow-release nitrogen fertilizer N3 (195 kg/hm²), 30% slow-release nitrogen fertilizer N4 (90 kg/hm²) and no nitrogen (N0) were set, in which phosphate and potassium fertilizers were applied according to uniform standards, with no fertilizer CK as the control, the effects of different slow-release nitrogen fertilizer application rates on the dry matter accumulation, nitrogen accumulation uptake, soil nitrate nitrogen distribution and accumulation, yield and nitrogen utilization efficiency of summer maize were studied. Explanation of results: the application of nitrogen fertilizer can significantly increase the dry matter accumulation, nitrogen uptake and yield of summer maize. Compared with the local conventional nitrogen application (N1 treatment), the above-ground dry matter accumulation and nitrogen accumulation, nitrogen absorption efficiency, nitrogen partial productivity, yield and other indicators of N2 and N3 treatments were all increased significantly. Two-year trial, there was no significant difference between N2 treatment and N3 treatment in dry matter accumulation, cumulative nitrogen uptake, and yield. However, the partial productivity of nitrogen fertilizer of N3 treatment was increased by 54.61% and 56.25% compared with that of N2, and the agronomic utilization rate of nitrogen was increased by 35.24% and 61.48%, the nitrogen transfer rate of

vegetative organs was increased by 17.34% and 18.10%, respectively. Reduced application of slow-release nitrogen fertilizer can significantly reduce the residual nitrate nitrogen in the 0~200 cm soil layer, and increase the proportion of nitrate nitrogen in the 0~40 cm soil layer. The highest proportion of nitrate nitrogen in the 0~40 cm soil layer was N3 treatment compared with other nitrogen application treatments, and it was increased by 6.82%~118.60%. Under the condition that both high yield and high nitrogen use efficiency and low nitrogen loss can be satisfied, the application rate of pure nitrogen of slow-release nitrogen fertilizer of 195 kg/hm² was the best fertilization method in this area.

Key words: summer maize; slow release nitrogen fertilizer; yield; nitrogen use; soil nitrate nitrogen

0 引言

玉米是我国三大粮食作物之一,2018年我国玉米种植面积达0.421亿hm²,占我国粮食作物种植面积的35.99%^[1]。玉米是陕西省重要的粮食作物^[2],陕西省玉米生产的稳定性关乎国家的粮食安全^[3]。氮素是玉米生长过程中吸收最多的营养元素,对玉米的生长及生理均具有显著影响^[4-6]。土壤中所含氮素相对较少,因此必须通过施加氮肥来满足玉米的生长需求,从而获得高产。研究表明,陕西关中地区玉米种植纯氮施用量为(288±113)kg/hm²^[7],普遍存在为盲目追求产量而超量施用氮肥的现象,导致土壤养分失衡、氮肥利用效率下降^[8-10],当氮肥施用量超过作物所需的量时,还会降低作物抵抗病虫害的能力和作物产量^[11]。因此,在农业生产过程中,合理选择氮肥种类及施用量非常重要。

在玉米生长过程中,采用基施加追施的施肥方式在一定程度上可以提高氮肥利用效率,但是多次施肥存在劳动力浪费、生产效率低等问题^[12]。缓释肥具有调控氮素释放速度、满足作物整个生育期内氮素需求的特点^[13]。姬景红等^[14]和郭萍等^[15]研究发现,缓释肥相比于普通尿素更有利于玉米的氮素吸收和累积,可提高玉米产量和品质。易镇邪等^[16]研究表明,在同等低施氮下,树脂包膜尿素比普通尿素氮素利用率高。衣文平等^[17]研究发现,不同用量的缓释肥和尿素配施均能提高玉米的籽粒氮素累积量、产量和经济效益。曹宁等^[18]研究发现,以硅藻土为载体的情况下,缓释氮肥处理在氮素吸收、氮肥利用效率、产量等方面优于普通尿素一次基施处理,与普通尿素分次施用的效果相当。夏玉米一次基施缓/控释肥可以满足玉米后期的氮素需求,与普通尿素相比能够实现增产增收,可以作为实现简化栽培的重要技术措施^[19]。

近年来,对于缓释肥的研究主要集中在不同包膜类型、与普通尿素的不同配比、不同基追比等对作物生长及产量的影响方面,研究对象主要为高原地区和东北地区生育期较长的小麦和春玉米^[20-22],而对关中地区的主要粮食作物夏玉米的研究还不够充

分。关中平原玉米产量占陕西省玉米总产量60%以上,且主要依靠大量施肥来提高产量^[23]。本研究以不施肥为对照,对比研究当地常规施氮与缓释肥不同比例减施对关中地区夏玉米地上部干物质累积量和氮素累积吸收量、土壤硝态氮分布及残留量、产量及其构成因素、氮肥利用效率及转运率的影响,旨在进一步优化关中地区夏玉米施肥模式,为关中地区合理施肥提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

分别于2018年6—10月、2019年6—10月在陕西省杨凌区西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室灌溉试验站(34°17′38″N, 108°4′8″E)进行试验。试验站所在地为暖温带季风半湿润气候,海拔521m,多年平均气温、年降水量、年蒸发量分别为12.9℃、630mm(主要集中在7、8、9月)和1500mm,该试验田土壤质地为壤土,平均干容重1.40g/cm³,0~20cm土层土壤初始理化性质为pH值8.12,有机质质量比18.2g/kg,全氮质量比0.95g/kg,碱解氮质量比68.25mg/kg,速效磷质量比21.45mg/kg,速效钾质量比156.96mg/kg。

2018年和2019年夏玉米生育期内逐日气温和降雨量动态变化如图1所示。2018年夏玉米生育期内日平均气温24.36℃,总降雨量418.20mm,日平均降雨量3.70mm;2019年日平均气温23.19℃,总降雨量507.30mm,日平均降雨量4.65mm,2019年比2018年雨水更加充足。

1.2 试验设计

两年试验玉米品种均为“郑单958”,所用肥料包括普通氮肥(尿素,N质量分数大于等于46%)、磷肥(过磷酸钙,P₂O₅质量分数大于等于16%)、钾肥(农业用硫酸钾,K₂O质量分数大于等于51%)、缓释氮肥(硫包衣氮肥,N质量分数大于等于37%)。试验采用随机区组设计,小区面积16m²(4m×4m),3次重复,各小区之间设置1m间隔,中间种植一行玉米作为保护行,以减少光照不均匀对试验的影响。试验共设6个处理,不施肥(CK);不施

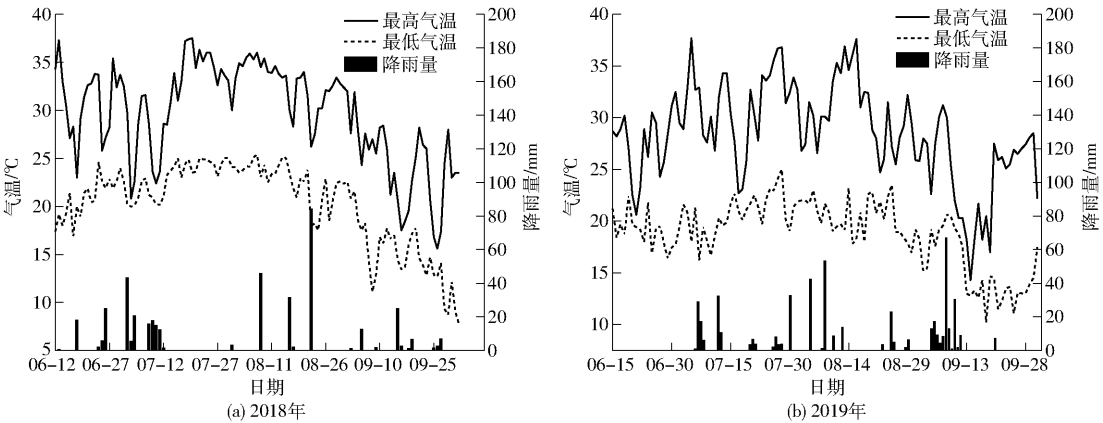


图1 试验站2018年和2019年夏玉米生育期内逐日气温和降雨量变化

Fig.1 Daily temperature and rainfall changes during summer maize growth period of experimental station in 2018 and 2019

氮(N0);常规施氮(N1,施氮量300 kg/hm²);100%缓释氮肥(N2,施氮量300 kg/hm²);65%缓释氮肥(N3,施氮量195 kg/hm²);30%缓释氮肥(N4,施氮量90 kg/hm²),其中N1处理为当地农民常规施氮量。CK处理不施加任何化肥,其他处理施用磷、钾肥量相同,施用量分别为120 kg/hm² (P₂O₅)和135 kg/hm² (K₂O)。种植方向为南北种植,种植方式按行距50 cm、株距30 cm进行人工点播。

2018年于6月12日种植,10月2日收获,2019年于6月15日种植,10月3日收获。两年试验为定位试验,为消除第1年试验土壤中残留的养分对第2年玉米试验的影响,在2018年10月—2019年6月在本试验田种植小麦,但不施加任何肥料,使2019年种植玉米时各处理土壤中所含养分含量和2018年基本相等。除草、杀虫等管理措施均按同一标准进行。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 植株样品采集与测定

分别于夏玉米苗期、拔节期、吐丝期、灌浆期、成熟期取样,每个处理选取长势均匀且具有代表性的植株5株,苗期到吐丝期取样时将叶片与茎秆分开,灌浆期与收获期取样时将茎秆(含雄穗)、叶片、玉米穗分开,放入干燥箱105℃杀青30 min,75℃干燥至质量恒定,计算地上部干物质量,夏玉米地上部干物质量总量为其各器官干物质量之和。成熟期选取长势均匀的一行玉米进行测产,每个处理取3次重复,共计3行,测量指标主要有穗长、穗粗、穗行数、行粒数、单穗籽粒质量、百粒质量等。

在测完夏玉米各个器官干质量后,将其磨碎,过0.5 mm筛,用浓硫酸-双氧水消煮,再用连续流动分析仪(Auto Analyzer-Ⅲ型,德国Bran Luebbe公司)测定各个器官全氮含量。玉米成熟期氮素吸收总量为各个器官氮素吸收量之和。

1.3.2 土样采集与测定

分别在夏玉米的播前和收获后用直径5 cm的

土钻取土,取土深度为2 m,每10 cm取1土样。每个小区取3次重复,将取出的土样晾干后磨碎过2 mm筛,称取2.5 g土样用25 mL浓度为2 mol/L的KCl提取液进行振荡提取,过滤后的提取液用连续流动分析仪(Auto Analyzewr-Ⅲ型,德国Bran Luebbe公司)测定土壤硝态氮含量。

1.4 相关指标计算

夏玉米生育期内的氮素吸收量、利用率、转运率等相关指标的计算公式为^[24-25]

$$T_{NA} = N_C D_M \tag{1}$$

$$N_{RE} = \frac{T_{NA}}{D_M} \tag{2}$$

$$N_{PPF} = \frac{Y_N}{E_N} \tag{3}$$

$$N_{AE} = \frac{Y_N - Y_0}{E_N} \tag{4}$$

式中 T_{NA} ——植株氮素累积量,kg/hm²
 N_{RE} ——氮素吸收效率,kg/kg
 N_{PPF} ——氮肥偏生产力,kg/kg
 N_{AE} ——氮肥农学利用率,kg/kg
 N_C ——植株含氮率,%
 D_M ——植株地上部干物质累积量,kg/hm²
 E_N ——施氮量,kg/hm²
 Y_N ——施氮处理籽粒产量,kg/hm²
 Y_0 ——不施氮处理籽粒产量,kg/hm²

营养器官氮素转运量(kg/hm²)为吐丝期营养器官氮素吸收量减去成熟期营养器官氮素吸收量;吐丝期后氮素吸收量(kg/hm²)为成熟期氮素吸收总量减去吐丝期营养器官氮素吸收量;营养器官氮素转运率(%)为营养器官氮素转运量占吐丝期营养器官氮素吸收量百分比。

1.5 数据处理

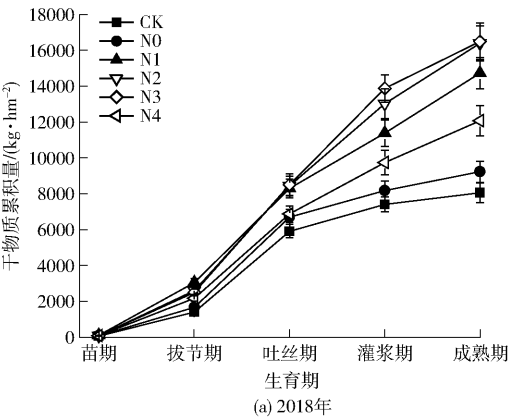
用Excel 2019软件对试验数据进行基础整理;用SPSS 20.0软件对各指标进行方差分析,多重比

较采用 Duncan 新复极差法,显著水平 $\alpha = 0.05$;用 OriginPro 8.5 软件制图。

2 结果与分析

2.1 缓释氮肥减施对夏玉米地上部干物质累积的影响

由图 2 可知,随着生育期的推进,夏玉米地上部干物质累积量呈逐渐递增的趋势,均在成熟期达到



最大。2018 年和 2019 年,苗期不同处理干物质累积量无显著差异,拔节期及以后,施氮处理的夏玉米干物质累积量均显著高于不施肥和不施氮处理。拔节期干物质累积量最大的为 N1 处理,比其他施氮处理提高 12.84% ~ 94.16%。2018 年,吐丝期至成熟期干物质累积量最大的均为 N3 处理,2019 年,吐丝期和灌浆期干物质累积量最大的为 N2 处理,成熟期最大的为 N3 处理,整个生育期内,N2 和 N3 处

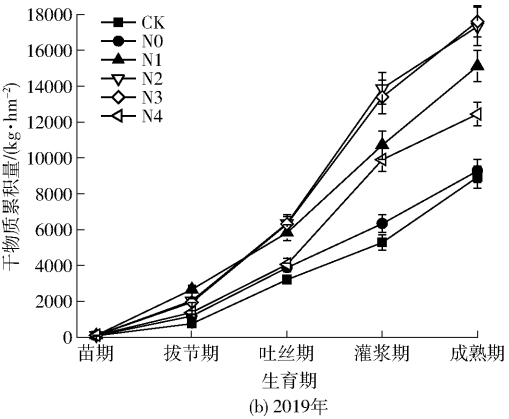
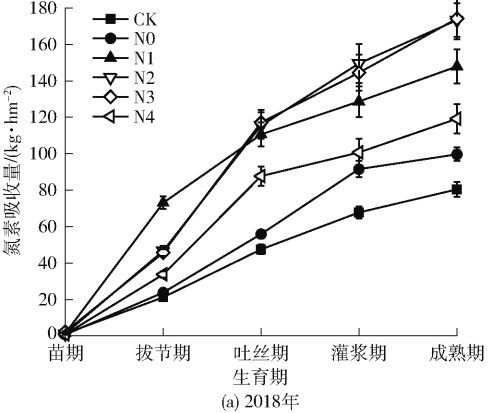


图 2 不同施氮处理下夏玉米各生育期地上部干物质累积量变化曲线

Fig. 2 Dry matter accumulation change curves of summer maize in different growth periods under different nitrogen treatments

理的干物质累积量均无显著差异。

2018 年和 2019 年,施氮处理夏玉米成熟期干物质累积量分别比 CK 处理提高 39.2% ~ 63.2% 和 23.1% ~ 61.2%,比 N0 处理提高 30.8% ~ 53.4% 和 9.6% ~ 43.6%。两年试验 N3 处理成熟期干物质累积量分别达到 16 465.15、17 572.75 kg/hm²,比 N1 处理提高 11.7% 和 16.6%,差异显著。由于 N4 处理施氮量相比 N1 处理减少 70%,仅有 90 kg/hm²,所以 N4 处理干物质累积量较 N1 处理有所下降,两年成熟期干物质累积量分别比 N1 处理减少 4.8% 和 11.0%。玉米成熟期干物质累积量由大到小总体表现为 N3 处理、N2 处理、N1 处理、N4 处理、N0 处理、CK。



2.2 缓释氮肥减施对夏玉米氮素累积的影响

随着夏玉米生育期的推进,氮素吸收量呈逐渐递增的趋势(图 3)。苗期各个处理夏玉米氮素吸收量均无显著差异。在拔节期及以后,施氮处理的夏玉米氮素吸收量显著高于不施氮处理和不施肥处理。拔节期氮素吸收量最大的为 N1 处理,高于其他施氮处理 39.06% ~ 129.06%,吐丝期及以后氮素吸收量最大的为 N2 或 N3 处理,两处理无显著差异。2018 年和 2019 年,施氮处理成熟期夏玉米氮素累积量比不施氮处理分别高 19.54% ~ 115.58% 和 20.96% ~ 121.00%,两年成熟期氮素累积量最大的均为 N3 处理,分别为 174.16、170.98 kg/hm²,比 N1 处理提高 17.72% 和 21.35%,N4 处理成熟期氮素吸收量比 N1 处理降低 24.14% 和

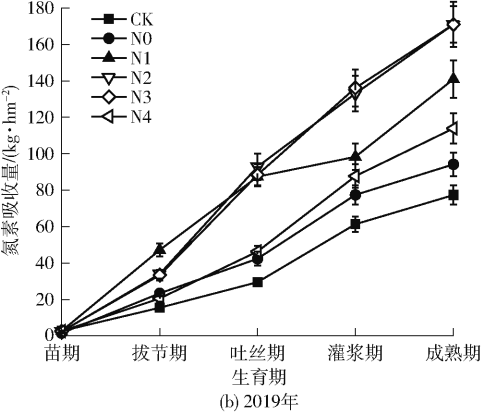


图 3 不同施氮处理下夏玉米各生育期地上部氮素吸收量变化曲线

Fig. 3 Nitrogen uptake change curves of summer maize under different nitrogen treatments at different growth stages

23.74%。各处理夏玉米成熟期氮素累积吸收量由大到小总体表现为 N3 处理、N2 处理、N1 处理、N4 处理、N0 处理、CK, 与成熟期干物质累积量有相同的趋势。

2.3 夏玉米收获期土壤硝态氮分布和累积

2018 年和 2019 年, 各个处理 0~200 cm 土层硝态氮质量比均呈先增大后减小的趋势(图 4), N1 处理两年分别在深度 80 cm 和 100 cm 处达到最大, 最大值分别为 26.91 mg/kg 和 28.74 mg/kg, 其他处理

均在深度 20 cm 处达到最大, 且在 20 cm 后逐渐减小, 所有处理硝态氮含量都在深度 200 cm 处达到最低值。从图 4 可看出, 缓释肥处理(N2、N3 和 N4)硝态氮主要集中在 0~40 cm, 从 40 cm 后硝态氮含量明显降低, 说明缓释氮肥处理土壤中硝态氮主要残留在表层, 还可以被下季作物利用, 可提高氮肥利用效率。普通氮肥处理(N1)硝态氮主要集中在 60~120 cm 处, 说明 N1 处理氮肥存在淋失风险, 降低了氮肥利用效率。

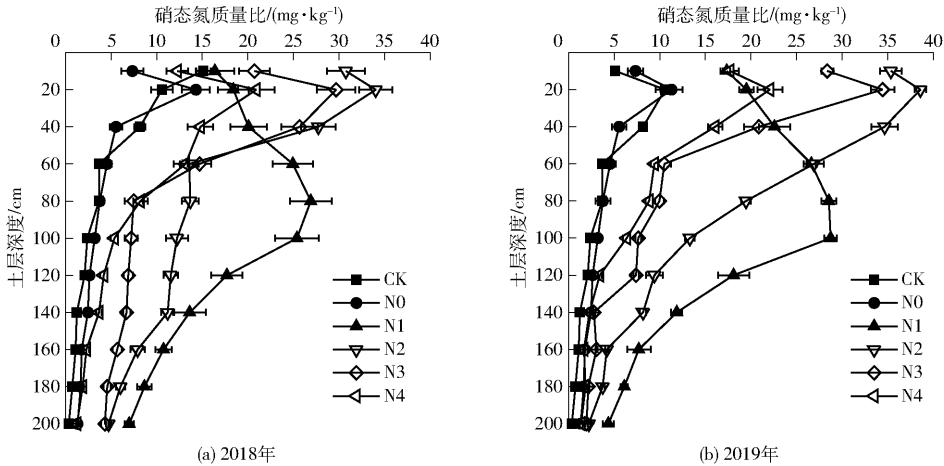


图4 不同施氮处理下夏玉米成熟期 0~200 cm 土层硝态氮分布

Fig.4 Distributions of nitrate nitrogen in 0~200 cm soil layer of summer maize under different nitrogen treatments

由图 5(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$))可知, 0~200 cm 土壤中硝态氮残留总量随施肥量的增加而增加, 施肥量相同的 N1 和 N2 处理, N2 处理硝态氮残留量显著降低, 由大到小总体表现为 N1 处理、N2 处理、N3 处理、N4 处理、N0 处理、CK。2018 年和 2019 年, 0~40 cm 土层硝态氮累积量最大的均为 N2 处理, 较其他施氮处理提高 16.45%~91.43%, 虽然 N3 处理施氮量比 N1

处理降低 35%, 但 0~40 cm 土壤硝态氮含量比 N1 处理增加 35.76%~36.17%。两年试验, 在所有施肥处理中 0~40 cm 土层硝态氮累积量占 0~200 cm 土层硝态氮累积量比例最大的均为 N3 处理, 分别为 46.95% 和 55.11%, 占比最低的均为 N1 处理, 分别为 23.18% 和 25.21%。N3 处理 0~40 cm 土层硝态氮所占比例比其他施氮处理提高 6.82%~118.60%, N2 和 N4 处理 0~40 cm 土层硝态氮所占

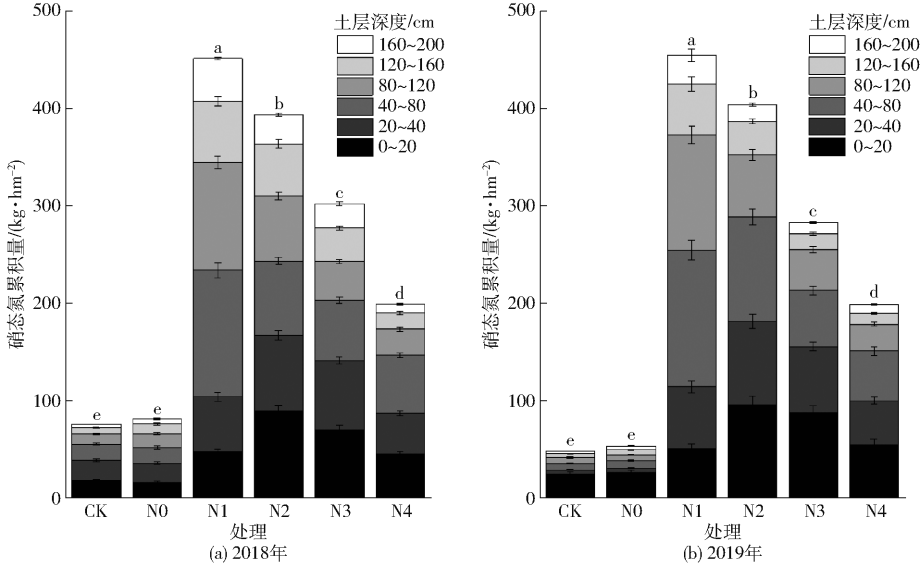


图5 不同施氮处理下夏玉米成熟期 0~200 cm 土层硝态氮累积量

Fig.5 Accumulation of nitrate nitrogen in 0~200 cm soil layer of summer maize under different nitrogen treatments

比例比 N1 处理提高 78.54% ~ 100.32%。说明缓释氮肥可以显著增加 0 ~ 40 cm 土层硝态氮含量,减小氮素淋失风险,提高氮肥利用效率。

2.4 缓释氮肥减施对玉米产量及构成因素的影响

由表 1 可知,2018 年和 2019 年,与 CK 和 N0 处理相比,其他施加氮肥的处理在穗长、穗粗、穗行数、产量等相关指标上均有显著提高,且与 CK 和 N0 处理均有显著差异。施加氮肥处理比不施肥处理(CK)增产 54.21% ~ 116.16%,比不施氮处理(N0)增产 19.10% ~ 71.63%。两年试验产量最高的均为 N3 处理,N2 比 N3 处理略低,差异不显著。与 N1 处理相比,由于 N4 处理施氮量只有 N1 的 30%,故产量等相关因素均有所下降,但 N2 和

N3 处理的各项指标比 N1 处理均有不同程度的增加。在 2018 年试验中,N2、N3 处理相比 N1 处理,在穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒质量指标上没有显著差异,但在单穗籽粒质量和产量指标上有显著差异,其中,N2 和 N3 处理比 N1 处理分别增产 4.02% 和 4.61%,N4 处理比 N1 处理减产 18.12%。在 2019 年试验中,N2、N3 处理相比 N1 处理,各个指标均有所提高,N2 和 N3 处理比 N1 处理分别增产 8.27% 和 8.80%,N4 比 N1 处理减产 20.06%。两年试验中,各个处理夏玉米产量由大到小总体表现为 N3 处理、N2 处理、N1 处理、N4 处理、N0 处理、CK。总体趋势与成熟期干物质累积量相同。

表 1 不同施氮处理下夏玉米的产量及其构成因素

Tab.1 Summer maize yield and its constituent factors under different nitrogen treatments

年份	处理	穗长/cm	穗粗/mm	穗行数	行粒数	单穗籽粒质量/g	百粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)
2018	CK	12.53 ^d	41.98 ^d	10.67 ^c	26.33 ^c	74.95 ^e	11.22 ^c	5 268.59 ^e
	N0	14.67 ^{cd}	44.17 ^c	11.50 ^c	34.33 ^b	113.85 ^d	13.68 ^{bc}	6 821.38 ^d
	N1	18.23 ^a	46.95 ^{ab}	14.67 ^a	40.00 ^a	163.25 ^b	22.93 ^a	9 597.38 ^b
	N2	17.77 ^{ab}	48.26 ^a	15.33 ^a	43.33 ^a	180.69 ^a	23.25 ^a	9 983.63 ^a
	N3	18.27 ^a	48.74 ^a	14.67 ^a	42.67 ^a	183.72 ^a	23.73 ^a	10 040.14 ^a
	N4	15.63 ^{bc}	45.50 ^{bc}	12.67 ^b	36.67 ^b	129.73 ^c	19.73 ^b	8 124.43 ^c
2019	CK	11.03 ^e	41.09 ^e	10.00 ^c	25.33 ^e	71.37 ^e	10.62 ^d	4 974.70 ^e
	N0	13.13 ^d	43.92 ^d	11.33 ^{bc}	29.67 ^d	102.62 ^d	11.68 ^d	6 265.43 ^d
	N1	17.70 ^b	47.68 ^b	14.67 ^a	40.00 ^b	165.50 ^b	22.81 ^b	9 883.14 ^b
	N2	18.53 ^a	48.87 ^{ab}	15.33 ^a	43.33 ^a	184.97 ^a	24.33 ^a	10 700.52 ^a
	N3	18.77 ^a	49.39 ^a	15.33 ^a	44.33 ^a	188.23 ^a	24.97 ^a	10 753.31 ^a
	N4	16.00 ^c	46.16 ^c	12.00 ^b	35.33 ^c	126.98 ^e	21.13 ^c	7 900.72 ^c

注:同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.5 缓释氮肥减施对夏玉米氮肥利用效率和吐丝期后氮素吸收量及转运的影响

2018 年和 2019 年,缓释肥处理(N2、N3 和 N4)的氮素吸收效率和氮肥偏生产力均比 N1 处理有所提高,且随着缓释氮肥施氮量的下降,夏玉米的氮素吸收效率和氮肥偏生产力逐渐提高,均为 N4 处理最大,但由于 N4 处理夏玉米产量、干物质累积量等均比其他施氮处理小,所以综合考虑,氮素吸收效率和氮肥偏生产力最优的为 N3 处理,两年试验分别较 N2 处理提高 54.61% 和 56.25%。N1 ~ N4 处理氮肥农学利用率呈现出先增加后减小的趋势,两年均为 N3 处理最大,分别为 17.02、20.02 kg/kg,较其他施氮处理提高 17.54% ~ 84.00%,其中较 N2 处理提高 35.24% 和 61.48%(表 2)。施加氮肥可以显著提高夏玉米吐丝期后氮素吸收量、营养器官氮素转运量和转运率。两年试验,吐丝期后氮素吸收量最大的分别为 N2 处理和 N3 处理,由于普通尿素前期释放过快,吐丝期后植株能够吸收的养分很少,

所以 N2、N3、N4 处理吐丝期后氮素吸收量均比 N1 处理有所提高,两年分别提高 3.81% ~ 26.10% 和 19.93% ~ 33.25%。施加氮肥可以显著提高夏玉米营养器官氮素转运量和转运率,且两年试验氮素转运量和转运率最大的均为 N3 处理,分别较其他施氮处理提高 18.10% ~ 51.89% 和 17.34% ~ 57.20%,其中较 N2 处理提高 17.34% 和 18.10%。氮素转运率由大到小总体表现为 N3 处理、N2 处理、N1 处理、N4 处理、N0 处理、CK。

3 讨论

3.1 缓释氮肥减施对夏玉米地上部干物质累积量的影响

作物产量是由作物干物质质量决定的^[26],作物干物质质量的提高是获得籽粒高产的物质基础^[27]。本研究表明,在玉米苗期,地上部干物质累积量各处理之间无显著差异,这可能是因为苗期玉米植株较小,所需养分较少,积累的干物质相差不大。与普通氮

表 2 不同施氮处理下夏玉米的氮肥利用效率和吐丝期后氮素吸收量及转运量

Tab. 2 Nitrogen accumulation and operation before and after spinning stage of summer maize under different nitrogen treatments

年份	处理	氮素吸收效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	吐丝期后氮素吸 收量/(kg·hm ⁻²)	营养器官氮素转 运量/(kg·hm ⁻²)	营养器官氮素 转运率/%
2018	CK				57.44 ^c	4.71 ^e	20.19 ^e
	N0				59.47 ^c	9.12 ^d	22.59 ^{de}
	N1	0.49 ^d	31.99 ^d	9.25 ^c	65.36 ^{bc}	29.78 ^b	36.06 ^{bc}
	N2	0.58 ^c	33.28 ^c	10.54 ^c	88.44 ^a	32.42 ^b	38.17 ^{ab}
	N3	0.88 ^b	52.00 ^b	17.02 ^a	88.13 ^a	37.23 ^a	45.08 ^a
	N4	1.32 ^a	100.27 ^a	14.48 ^b	67.95 ^b	15.32 ^c	29.68 ^{cd}
2019	CK				56.69 ^c	4.88 ^d	23.55 ^d
	N0				54.98 ^c	8.55 ^{cd}	33.01 ^{cd}
	N1	0.47 ^d	32.94 ^d	12.06 ^c	58.45 ^c	33.60 ^b	40.68 ^b
	N2	0.57 ^c	35.67 ^c	14.78 ^c	83.86 ^a	35.40 ^b	40.94 ^b
	N3	0.88 ^b	55.15 ^b	20.02 ^a	87.56 ^a	37.07 ^a	48.04 ^a
	N4	1.27 ^a	87.79 ^a	16.17 ^b	73.00 ^b	12.64 ^c	30.56 ^c

肥相比,施等量缓释氮肥的情况下可以显著提高作物成熟期干物质质量,N2、N3 处理的成熟期干物质累积量较 N1 处理有显著提高,缓释氮肥减施 70% 时,由于每公顷氮含量仅有 90 kg,干物质累积量明显降低,这与许海涛等^[28]的研究结果相同。但赵欢等^[29]研究发现,缓释氮肥减量 15% 不会降低玉米成熟期的干物质累积量,但当缓释氮肥减施 30% 时,玉米成熟期的干物质累积量相比 100% 缓释氮肥显著降低,这可能是由玉米品种、试验年份和试验地点气候条件不同造成的。本研究还发现,在拔节期 N1 处理干物质累积量最大,但到了吐丝期及以后,干物质质量最大的为 N2 和 N3 处理,这与郭萍等^[15]的研究结果相同,说明缓释肥的肥力释放需要一定的时间,导致夏玉米生育前期肥力不及普通氮肥,但生育后期氮肥供应充足,使得缓释氮肥处理夏玉米生长性状超过普通氮肥处理。

3.2 缓释氮肥减施对土壤硝态氮残留的影响

氮肥施入土地后主要有 3 种去向:①直接被作物吸收利用。②在土壤内以无机氮形式残留。③以氨挥发、淋失或径流等途径流失^[30]。过多的氮素损失会影响作物的生长,降低氮肥利用效率,甚至会引发严重环境问题^[31]。由于缓释肥具有缓慢释放养分的特性,因此施加缓释肥相比于普通氮肥可以显著降低各土层中的硝态氮残留量,降低向土壤深层淋失的风险,同时降低地下水资源污染的风险^[32]。本研究表明,不施肥和不施氮处理,土壤中硝态氮含量两年内均保持最低水平,且随着施氮量的增加,土壤中残留的硝态氮量也随之增加(图 5),这与郭金金等^[33]的研究结果一致。N1 处理土壤中硝态氮主要集中在 60 ~ 100 cm 土

层,并且随着时间的推移,到下季作物时,硝态氮还会向更深层淋失,所以很难被下季作物利用^[34],而其他处理土壤中硝态氮主要集中在 0 ~ 40 cm 土层,能继续被下季作物吸收利用。这是由于缓释氮肥具有养分释放慢的特性,使得缓释肥释放的养分能够更加及时地被作物吸收利用,从而避免了养分下移的情况。而普通氮肥养分释放过快,多余的养分不能被作物吸收,从而随着雨水的下渗而被淋失到深层^[35]。但于淑芳等^[34]对小麦的研究发现,施用普通氮肥,硝态氮向下迁移主要集中在 60 cm 土层,这可能是由试验地点、气候或者作物种类等的差异造成的。本研究中,施用缓释氮肥可以显著降低 0 ~ 200 cm 土层中的硝态氮残留量,同时还可以显著提高 0 ~ 40 cm 土层硝态氮的占比,不仅有效地防止了氮素的淋失,还提高了作物的氮素吸收效率,这与周翔等^[36]的研究结果一致。

3.3 缓释氮肥减施对夏玉米产量的影响

在作物的生长过程中,氮肥的供应量直接影响作物的生长及产量,合理的氮素运筹是提高作物产量、减少氮素流失的重要保障^[37]。关于缓释肥的增产效应前人已做过大量研究,卢艳丽等^[38]研究发现,缓/控释肥能显著增加玉米的产量,比常规施肥产量提高 18.30%。史桂芳等^[39]研究表明,施用控释肥料与普通氮肥相同用量和减量 20% 时均有显著增产效果。本研究发现施用缓释氮肥与普通氮肥等量和减量 35% 情况下增产达显著水平,原因是缓释肥可以协调养分释放时间和强度,使氮素缓慢释放,使得夏玉米各生育期土壤中均有充足的氮素供应,提高作物产量^[40]。虽然 N3 处理比 N2 处理施

氮量减少 35%, 但两处理的产量及构成因素并无显著差异, 这可能是因为施氮量为 195 kg/hm^2 时, 氮素供应可以满足夏玉米的需求, 而施氮量提高到 300 kg/hm^2 , 只会使过多的养分残留在土壤中, 造成土壤硝态氮残留过多(图 5), 氮素吸收效率降低等问题。而当缓释肥施用量减少 70% 时(N4), 氮素供应不能满足玉米的生长需要, 导致减产, 这与史桂芳等^[39]的研究结果相同。

3.4 缓释氮肥减施对夏玉米氮肥利用及转运的影响

玉米籽粒中的氮素来源于两部分: 玉米吐丝期前储存在玉米营养器官内并在吐丝期后向籽粒转运的氮素和吐丝期后植株直接吸收的氮素^[24], 以上两种方式是作物利用氮素的主要形式, 明确作物氮素吸收和转运的动态过程, 是提高植株氮素利用效率的关键所在^[41]。孙云保等^[42]连续 4 年研究发现, 控释肥在减量 30% 条件下比普通氮肥显著提高了作物氮素吸收效率且产量没有降低, 胡迎春等^[22]研究表明, 在黄土高原地区, 氮肥减量下缓释肥与普通氮肥配施可显著提高作物氮肥农学利用率, 并保持较高的产量。本研究发现, 100% 缓释氮肥与 65% 缓释氮肥处理均可提高植株氮素累积量、氮素吸收效率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力以及营养器官氮素转运量和转运率(表 2), 这与刘诗璇等^[20]的研究结果一致, 这是因为缓/控释肥能够减缓氮素释放速率, 延长了释放期, 在一定程度上达到了氮肥后移的效果, 这不仅满足玉米整个生育期对氮素的需求, 同时还能减少肥料损失, 提高氮肥利用效率^[35]。N3 与 N2 处理相比, 在氮肥减量 35% 后, 反而提高了玉米植株的氮素吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学利

用率和营养器官氮素转运率, 这是因为施氮量为 195 kg/hm^2 是当地玉米合理的氮肥施用量, 当施氮量超过 195 kg/hm^2 时, 不但不会增产, 反而会造成氮肥利用效率低等问题。当缓释氮肥施用量减少 70% 时(N4), 虽然提高了玉米氮素吸收效率和氮肥偏生产力, 但是由于氮素供应不足, 玉米氮素累积量和产量明显下降。

4 结 论

(1) 与当地常规施氮 N1 处理相比, N2 处理(100% 缓释氮肥)和 N3 处理(65% 缓释氮肥)的地上部干物质质量及氮素累积吸收量、氮素吸收效率、氮肥偏生产力、产量等指标均有显著增加。

(2) 两年试验, N2 处理与 N3 处理的地上部干物质累积量、氮素累积吸收量、产量无显著差异, 但 N3 处理的氮肥偏生产力较 N2 分别提高 54.61% 和 56.25%, 氮肥农学利用率分别提高 35.24% 和 61.48%, 营养器官氮素转运率分别提高 17.34% 和 18.10%, 说明 N3 处理的氮素吸收利用效率更高。

(3) 缓释氮肥减施可以显著降低 0~200 cm 土层的硝态氮残留量, 并且可以提高 0~40 cm 土层硝态氮的占比, 两年试验, 0~40 cm 土层硝态氮占比最大的均为 N3 处理, 较其他施氮处理提高 6.82%~118.60%。

(4) 综合考虑氮素吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率以及夏玉米产量、干物质累积量、土壤硝态氮残留量等因素, 缓释氮肥纯氮施用量 195 kg/hm^2 (N3 处理) 是该地区较优的施肥方式。

参 考 文 献

- [1] 刘见, 宁东峰, 秦安振, 等. 氮肥减量后移对喷灌玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 42-49.
LIU Jian, NING Dongfeng, QIN Anzhen, et al. Impacts of reducing and delaying nitrogen application on yield and water and nitrogen use efficiency of summer maize under sprinkler fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 42-49. (in Chinese)
- [2] 高飞, 王弘, 施艳春, 等. 陕西省玉米品种布局的现状与分析[J]. 中国种业, 2014(7): 11-15.
GAO Fei, WANG Hong, SHI Yanchun, et al. Present situation and analysis of maize variety distribution in Shaanxi Province[J]. China Seed Industry, 2014(7): 11-15. (in Chinese)
- [3] 段敏. 陕西关中地区小麦玉米养分资源管理及其高产探索研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
DUAN Min. Study on nutrients management and high yield of wheat and maize in Guanzhong area of Shaanxi Province[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [4] 景立权, 赵福成, 徐仁超, 等. 施氮水平对超高产夏玉米籽粒及植株形态学特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 37-47.
JING Liqun, ZHAO Fucheng, XU Renchao, et al. Effects of nitrogen levels on the morphology characteristics of grain and plant of summer maize (*Zea mays* L.) under super-high yield conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 37-47. (in Chinese)
- [5] AMADUCCI S, COLAUZZI M, BATTINI F, et al. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the production of biogas from maize and sorghum in a water limited environment[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 76: 54-65.
- [6] 李文娟. 玉米 (*Zea mays* L.) 氮素营养生理及其与叶片衰老的关系[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
LI Wenjuan. Nitrogen physiology and its relation to leaf senescence of maize (*Zea mays* L.) [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)
- [7] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51-61.

- CHANG Yanli, LIU Junmei, LI Yuhui, et al. Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2014, 42(8):51–61. (in Chinese)
- [8] 李敏,叶舒娅,刘枫,等. 施用缓释氮肥对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(16):8895–8896, 8936.
- LI Min, YE Shuya, LIU Feng, et al. Effect of applying slow-release nitrogen fertilizer on summer maize yield and nitrogen fertilizer utilization[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(16):8895–8896, 8936. (in Chinese)
- [9] LI Q F, CHEN Y, LIU Y, et al. Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of maize in the Loess Plateau, China[J]. Field Crop Research, 2016, 157:1–10.
- [10] 王敬国,林杉,李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3):503–517.
- WANG Jingguo, LIN Shan, LI Baoguo. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3):503–517. (in Chinese)
- [11] LI S X, WANG Z H, HU T T, et al. Nitrogen in dryland soils of China and its management[J]. Advances in Agronomy, 2009, 101(8):123–181.
- [12] 周宝元,孙雪芳,丁在松,等. 土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11):2129–2140.
- ZHOU Baoyuan, SUN Xuefang, DING Zaisong, et al. Effect of tillage practice and fertilization on dry matter accumulation and grain yield of summer maize (*Zea Mays* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11):2129–2140. (in Chinese)
- [13] ZHENG W K, LIU Z G, ZHANG M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-release and uncoated urea in a wheat-maize system [J]. Field Crops Research, 2017, 205:106–115.
- [14] 姬景红,李玉影,刘双全,等. 控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(2):153–160.
- JI Jinghong, LI Yuying, LIU Shuangquan, et al. Effects of controlled release urea on spring corn yield, nitrogen efficiency and nitrogen balance[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(2):153–160. (in Chinese)
- [15] 郭萍,黄科程,李孝东,等. 普通、控释尿素对比对玉米物质积累及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1):191–196.
- GUO Ping, HUANG Kecheng, LI Xiaodong, et al. Effects of combined application of control-released urea and urea on dry matter accumulation and yield of maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1):191–196. (in Chinese)
- [16] 易镇邪,王璞,申丽霞,等. 不同类型氮肥对夏玉米氮素累积、转运与氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(5):772–778.
- YI Zhenxie, WANG Pu, SHEN Lixia, et al. Effects of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen fertilizer utilization in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(5):772–778. (in Chinese)
- [17] 衣文平,朱国梁,武良,等. 不同量的包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6):1497–1502.
- YI Wenping, ZHU Guoliang, WU Liang, et al. Application of different release duration controlled-release coated urea combined with conventional urea on summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6):1497–1502. (in Chinese)
- [18] 曹宁,陈至怡,闫飞,等. 控施尿素对玉米产量、氮肥利用率及土壤氮素的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34(1):86–89.
- CAO Ning, CHEN Zhiyi, YAN Fei, et al. Effect of control release urea on spring maize yield, N use efficiency and soil nitrogen[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2012, 34(1):86–89. (in Chinese)
- [19] 王宜伦,苗玉红,韩燕来,等. 缓/控释氮肥对玉米氮代谢、氮素积累量及产量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1):147–150.
- WANG Yilun, MIAO Yuhong, HAN Yanlai, et al. Slow/controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen metabolism and nitrogen accumulation of summer maize and the impact of production[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1):147–150. (in Chinese)
- [20] 刘诗璇,陈松岭,蒋一飞,等. 控释氮肥与普通氮肥配施对东北春玉米氮素利用及土壤养分有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5):939–947.
- LIU Shixuan, CHEN Songling, JIANG Yifei, et al. Nitrogen utilization of controlled release nitrogen fertilizer and common nitrogen fertilizer in northeast spring maize and the effect of soil nutrient availability[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(5):939–947. (in Chinese)
- [21] 孔丽丽,李前,侯云鹏,等. 控释氮肥不同施用位置对春玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(4):25–28.
- KONG Lili, LI Qian, HOU Yunpeng, et al. Effects of different application location of release-controlled nitrogen fertilizer on yield, nitrogen absorption and utilization of spring maize[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(4):25–28. (in Chinese)
- [22] 胡迎春,韩云良,施成晓,等. 氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原春玉米氮素利用和产量效益的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(7):1068–1078.
- HU Yingchun, HAN Yunliang, SHI Chengxiao, et al. Improving nitrogen use efficiencies, yields and profits for spring maize by using mixtures of slow-release fertilizer and normal urea in Loess Plateau[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2019, 28(7):1068–1078. (in Chinese)
- [23] 银敏华,李援农,李昊,等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):129–138.
- YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):129–138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160617&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017. (in Chinese)
- [24] MOLL R H, KAMPRATH E J, JACKSON W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(3):562–564.
- [25] GU X B, LI Y N, DU Y D. Optimized nitrogen fertilizer application improves yield, water and nitrogen use efficiencies of winter rapeseed cultivated under continuous ridges with film mulching[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 109(4):

- 233 – 240.
- [26] 黄智鸿,王思远,包岩,等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. 玉米科学,2007,15(3):95 – 98.
HUANG Zhihong, WANG Siyuan, BAO Yan, et al. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize[J]. Journal of Maize Sciences,2007,15(3):95 – 98. (in Chinese)
- [27] 李向岭,赵明,李从锋,等. 播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立[J]. 作物学报,2010,36(12):2143 – 2153.
LI Xiangling, ZHAO Ming, LI Congfeng, et al. Effect of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamic and establishment of its simulated model in maize[J]. Acta Agronomica Sinica,2010,36(12):2143 – 2153. (in Chinese)
- [28] 许海涛,许波,王友华,等. 氮肥减量缓释对夏玉米农艺指标、产量性状及氮肥利用效率的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2018,46(5):11 – 16.
XU Haitao, XU Bo, WANG Youhua, et al. Effects of nitrogen fertilizer reducing application amount slow-release on agronomy index, yield traits, nitrogen fertilizer use efficiency of summer maize[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition),2018,46(5):11 – 16. (in Chinese)
- [29] 赵欢,张萌,秦松. 缓释肥减量施用对覆膜栽培玉米生物性状、干物质积累与养分分配的影响[J]. 玉米科学,2017,25(1):139 – 146.
ZHAO Huan, ZHANG Meng, QIN Song, et al. Effects of controlled release fertilizer reduction in plastic mulching on biological characteristics, dry matter accumulation and distribution of nutrient content of maize[J]. Journal of Maize Sciences,2017,25(1):139 – 146. (in Chinese)
- [30] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学,2002,35(12):1493 – 1499.
JU Xiaotang, LIU Xuejun, ZOU Guoyuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica,2002,35(12):1493 – 1499. (in Chinese)
- [31] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature,2013,494(7438):459 – 462.
- [32] 朱晓霞,谭德水,江丽华,等. 减量施用控释氮肥对小麦产量效率及土壤硝态氮的影响[J]. 土壤通报,2013,44(1):179 – 183.
ZHU Xiaoxia, TAN Deshui, JIANG Lihua, et al. Reduced application of controlled-release nitrogen fertilizer on wheat yield efficiency and effects of soil nitrate nitrogen[J]. Chinese Journal of Soil Science,2013,44(1):179 – 183. (in Chinese)
- [33] 郭金山,张富仓,王海东,等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(20):3930 – 3943.
GUO Jinjin, ZHANG Fucang, WANG Haidong, et al. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates[J]. Scientia Agricultura Sinica,2017,50(20):3930 – 3943. (in Chinese)
- [34] 于淑芳,杨力,张民,等. 控释肥对小麦玉米生物学性状和土壤硝酸盐积累的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(1):128 – 133.
YU Shufang, YANG Li, ZHANG Min, et al. Effect of controlled release fertilizers on the biological properties of wheat and corn and soil nitrate accumulation[J]. Journal of Agro-Environment Science,2010,29(1):128 – 133. (in Chinese)
- [35] 张美微,乔江方,谷利敏,等. 不同土层氮肥配施方式对夏玉米生长发育及氮肥利用的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(20):66 – 70.
ZHANG Meiwei, QIAO Jiangfang, GU Limin, et al. Influence of nitrogen fertilizer combined application in different soil layers on growth development and nitrogen use of summer maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2017,33(20):66 – 70. (in Chinese)
- [36] 周翔,陈上,何川,等. 覆膜和控/缓释肥互作对春玉米生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):321 – 330.
ZHOU Xiang, CHEN Shang, HE Chuan, et al. Influences of interactions of plastic film mulching and controlled/slow release fertilizer on growth and nitrogen utilization of spring maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):321 – 330. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190835&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.035. (in Chinese)
- [37] 朱红英,董树亭,胡昌浩,等. 不同控释肥用量对玉米生产效应的影响[J]. 玉米科学,2007,15(2):114 – 116.
ZHU Hongying, DONG Shuting, HU Changhao, et al. Study on different dosages of controlled-release fertilizers in influencing the yield and efficiency of maize[J]. Journal of Maize Sciences,2007,15(2):114 – 116. (in Chinese)
- [38] 卢艳丽,白由路,王磊,等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(1):209 – 215.
LU Yanli, BAI Youlu, WANG Lei, et al. Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat – maize in North China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2011,17(1):209 – 215. (in Chinese)
- [39] 史桂芳,董浩,衣文平,等. 不同用量长效控释肥对夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 山东农业科学,2017,49(7):95 – 98.
SHI Guifang, DONG Hao, YI Wenping, et al. Effects of different application rates of longterm controlled-release fertilizer on growth, development and yield of summer maize[J]. Shandong Agricultural Sciences,2017,49(7):95 – 98. (in Chinese)
- [40] 胡娟,吴景贵,孙继梅,等. 氮肥减量与缓控肥配施对土壤供氮特征及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(4):116 – 120.
HU Juan, WU Jingui, SUN Jimei, et al. Effects of reduced nitrogen fertilization and its combined application with slow and controlled release fertilizers on soil nitrogen characteristics and yield of maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(4):116 – 120. (in Chinese)
- [41] ZOTARELLIA L, SCHOLBERG B J M, DUKESA M D, et al. Fertilizer residence time affects nitrogen uptake efficiency and growth of sweet corn[J]. Journal of Environmental Quality,2008,37(3):1271.
- [42] 孙云保,张民,郑文魁,等. 控释氮肥对小麦-玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4):115 – 121.
SUN Yunbao, ZHANG Min, ZHENG Wenkui, et al. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on wheat – maize rotation yield and soil nutrient status[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(4):115 – 121. (in Chinese)